

Über die Vorgänge an der Kathode von Bogenentladungen.

Von **O. Becken** und **K. Sommermeyer** in Greifswald.

Mit 4 Abbildungen. (Eingegangen am 23. Juli 1936.)

Wiederholung und Fortsetzung früherer Untersuchungen von Bögen mit Wolfram- und Kohlelektroden haben zu folgenden Ergebnissen geführt: Mit Wolfram- und Kohlelektroden können zwei verschiedene Bogenformen beobachtet werden. Die eine Bogenform besitzt einen wenig leuchtenden, umherirrenden Brennfleck, und ihr Kathodenfall hängt nur wenig vom Gasdruck ab. Die andere Bogenform hat einen hell glühenden Kathodenfleck, ihr Kathodenfall nimmt mit abnehmendem Gasdruck stark zu und ist ganz allgemein größer als der Kathodenfall der ersteren Bogenform. Aus experimentell festgestellten Existenzbedingungen der beiden Bogenformen geht hervor, daß der Bogen mit dem umherirrenden Brennfleck nur dann beständig brennen kann, wenn die Kathodenoberfläche mit Gas beladen ist. Er muß als Feldbogen gedeutet werden, wobei die Gasbildung eine Erhöhung sowohl der autoelektronischen Emissionsfähigkeit als auch des Feldes, welches die Emission hervorruft, bewirken kann. Der Bogen mit dem hell glühenden Brennfleck stellt einen thermischen Bogen dar.

Die thermische Bogentheorie, nach der die Elektronen von dem Brennfleck auf der Kathode rein thermisch entsprechend der Richardson-Gleichung emittiert werden, führt bekanntlich zu verschiedenen Schwierigkeiten, deren beträchtlichste sich ergeben, wenn man versucht, die Existenz der Bögen mit niedrig siedenden Kathoden und die häufig festgestellten erheblichen Beweglichkeiten des Kathodenfleckes zu deuten. Man hat sich daher veranlaßt gesehen, nach Vorgängen zu suchen, welche unter den in Bogenentladungen herrschenden Umständen auch eine genügende Elektronenemission von kalten Kathoden ermöglichen, und hält es heute im Anschluß an Langmuir wohl ganz allgemein für sehr wahrscheinlich, daß dabei die Autoelektronenemission eine ausschlaggebende Rolle spielt. Hiernach ist also anzunehmen, daß die Metalle, welche bis zu ihrer Siedetemperatur nur eine geringe thermische Elektronenemission aufweisen, als Kathoden in der Bogenentladung die Elektronen autoelektronisch unter dem Einfluß eines vor der Kathode bestehenden starken elektrischen Feldes emittieren. Dementsprechend hat Ramberg¹⁾ die Metalle in zwei Gruppen eingeteilt²⁾. Die erste Gruppe enthält die Substanzen (vor allem

¹⁾ W. Ramberg, Ann. d. Phys. (5) **12**, 314, 1932. — ²⁾ Von der Einteilung der Metalle in diese beiden Gruppen muß anscheinend grundsätzlich ihre Einordnung in die Rambergsche Reihe unterschieden werden. Denn nach den Ergebnissen von H. Plesse, Ann. d. Phys. (5) **22**, 473, 1935, ist wohl kaum noch ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Fähigkeit, die Bildung eines thermischen Bogens zu gestatten, und der Stellung in der Reihe ersichtlich.

Kohle und Wolfram), welche unterhalb ihrer Siedetemperatur eine große thermische Elektronenemission besitzen und daher als Kathodenmaterial die Entstehung thermischer Bögen gestatten. Die Metalle der zweiten Gruppe (Quecksilber, Silber, Kupfer u. a.) haben unterhalb ihrer Siedetemperatur nur eine geringe thermische Elektronenemission und lassen daher als Kathoden nicht die Entstehung von thermischen Bögen, sondern, wie man annimmt, nur von Feldebögen zu.

Die Rambergsche Betrachtung läßt natürlich offen, wieweit bei der Benutzung von Kathoden der ersten Gruppe der thermische Bogen nicht nur eine mögliche, sondern auch die einzige stabile Bogenform darstellt. In der Tat legen verschiedene Beobachtungen die Annahme nahe, daß die Metalle dieser Gruppe ganz allgemein, je nach den Versuchsbedingungen, sowohl das Bestehen eines thermischen als auch eines Feldebogens — oder einer anderweitigen dementsprechenden Bogenform — erlauben. So haben Becken und Seeliger¹⁾ beobachtet²⁾, daß man beim Wolframbogen unmittelbar nach der Zündung zunächst einen umherirrenden Kathodenfleck von niedriger Temperatur erhält, daß er nach einiger Zeit jedoch seine Bewegung aufgibt und sich dann auf heller Weißglut befindet; und diesen Tatbeständen entsprechend haben sie vermutet, daß die Entladungsform mit dem hell glühenden Kathodenfleck als thermischer Bogen zu deuten ist und die erstere als Feldebogen. Ähnliche Beobachtungen wie am Wolframbogen haben bereits vor längerer Zeit Seeliger und Schmick³⁾, ferner Seeliger und Wulfhekel⁴⁾ auch am Kohlebogen gemacht. Bei höheren Drucken erhält man hier einen hell glühenden, verhältnismäßig ruhigen Kathodenfleck, bei geringeren Drucken nimmt er an Flächengröße zu, um sich bei Drucken von einigen cm Hg plötzlich zusammenzuziehen, nur dunkel zu glühen und rasch umherzulaufen. Brennt der Bogen in Edelgasen, so kann nur die letztere Form festgestellt werden. Alle diese Beobachtungen lassen vermuten, daß ebenso wie beim Wolfram auch bei Kohle je nach den Umständen sowohl thermische als auch Feldebögen existieren können.

In der vorliegenden Arbeit werden die Eigenschaften des Wolframbogens und des Kohlebogens eingehender miteinander verglichen mit dem Ziel, die Existenzbedingungen der beiden Bogenformen zu klären. Die Untersuchung von Becken und Seeliger haben wir auf tiefere Gasdrucke

¹⁾ O. Becken u. R. Seeliger, Ann. d. Phys. (5) **24**, 609, 1935. — ²⁾ Vgl. hierzu auch ähnliche gelegentliche Beobachtungen bei M. Wehrli, Helv. Phys. Acta **1**, 333, 1928; H. Plesse, l. c. — ³⁾ R. Seeliger u. H. Schmick, Phys. ZS. **28**, 605, 1927. — ⁴⁾ R. Seeliger u. H. Wulfhekel, ebenda **31**, 691, 1930.

ausgedehnt und die früheren Untersuchungen von Schmick, Seeliger und Wulfhekel an Kohle wiederholt. Die Resultate führen zu dem Schluß, daß die Bogenform mit dem umherirrenden Brennfleck durch eine Gasbeladung der Kathode (oder eine schlecht leitende Oberflächenschicht) bedingt ist und daß ferner die Zuordnung der beiden Bogenformen zu thermischen und Feldbogen wesentlich an Wahrscheinlichkeit gewinnt.

Die Versuchsbedingungen.

Die Versuche wurden durchweg mit einer Anordnung ausgeführt, wie sie in ähnlicher Weise in der Arbeit von Becken und Seeliger (vgl. dort Fig. 7) beschrieben ist. Als Füllgas haben wir Stickstoff benutzt. Kathoden waren Stäbe von etwa 5 mm Durchmesser, bei Kohle meist Platten von etwa 6 mm Dicke. Als Anode diente fast immer ein mit Wasser gekühlter Kupferblock, der zur Zündung mit der Kathode in Berührung gebracht werden konnte. Die bei sämtlichen Versuchen benutzte Gleichspannung betrug 440 Volt, als Bogenstromstärke haben wir meist 5 Amp. gewählt. Den Abstand der Elektroden voneinander haben wir nach der Zündung meist auf etwa 2 mm eingestellt und dann die Bogenspannung mit einem gewöhnlichen Gleichstrominstrument gemessen, die Richtigkeit dieser Messungen aber durch oszillographische Aufnahmen nachgeprüft.

Die Versuchsergebnisse.

Die Versuchsergebnisse sind in den Druck-Spannungsdiagrammen (Fig. 1, 3, 4) enthalten.

a) *Wolfram* (Fig. 1). Zündet man den Bogen bei höheren Drucken (etwa 60 cm Hg), so erhält man zunächst die Bogenform mit dem umherirrenden Kathodenfleck, verhältnismäßig niedrigen Temperaturen und einer Brennspannung von etwa 45 Volt. Diese Bogenform und ihre Spannung ändern sich nicht, solange die Kathode kalt bleibt. (Durch geeignete Kühlung kann man nach Becken und Seeliger erreichen, daß dieser Bogen auch stationär brennt.) Pumpst man, solange dies der Fall ist, den Stickstoff allmählich ab, so ergeben sich der Reihe nach die Werte der unteren Charakteristik, wobei immer das Aussehen des

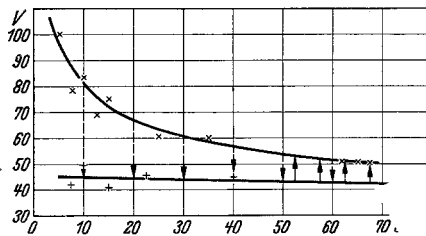


Fig. 1. Wolfram, 5 Amp.

Die Übergänge von der oberen auf die untere Charakteristik finden nur bei starker Verunreinigung und Sauerstoffzusatz statt, die Übergänge von der unteren auf die obere bei kleinen Drucken auf dem Umweg über die Glimmentladung.

Kathodenfleckes erhalten bleibt. Die gleichen Spannungswerte stellt man fest, wenn man die Entladung erst bei den betreffenden kleineren Drucken zündet.

Wenn man die Entladung bei einem bestimmten Druck längere Zeit brennen läßt, so daß die Kathode heiß werden kann, sind die Vorgänge bei hohen Drucken gänzlich anders als bei tiefen. Bei hohen Drucken steigt dann die (mittlere) Spannung langsam und stetig mit der Zeit an, das Glühen des Kathodenfleckes wird stärker, bis er sich schließlich auf heller Weißglut befindet und dann stehenbleibt. Ein Spannungsoszillogramm dieses Überganges von der unteren auf die obere Charakteristik zeigt Fig. 2. Man erkennt deutlich den stetigen Anstieg der Spannung, also einen wirklich stetigen Übergang von der unteren zur oberen Charakteristik. Lediglich

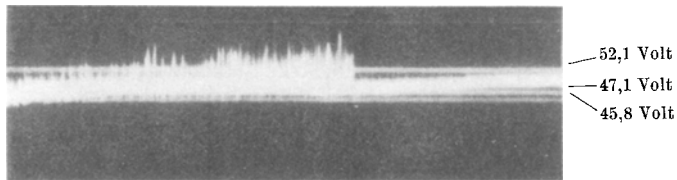


Fig. 2.

$p = 70 \text{ cm Hg. } i = 4 \text{ Amp.}$ Dauer des Vorganges: 10 Sekunden.

die Brennfleckbewegung ändert sich diskontinuierlich. Ihr scheint jedoch keine größere Bedeutung zuzukommen. So kann man deutlich erkennen, daß der Brennfleck seine hohe Temperatur bereits erreicht hat, während er noch umherirrt.

Pumpt man nun, nachdem die obere Charakteristik erreicht ist, den Stickstoff langsam ab, so erhält man der Reihe nach die Spannungswerte der oberen Charakteristik, also mit abnehmendem Druck stark ansteigende Spannungen, wobei der Kathodenfleck dauernd strahlend weißes Licht aussendet und sich im übrigen langsam ausdehnt. Ein Übergang von der oberen Charakteristik auf die untere kann bei einigermaßen sauberen Bedingungen auch bei tiefen Drucken trotz der dort bestehenden großen Spannungsunterschiede niemals beobachtet werden. Die Entladung mit der oberen Charakteristik besitzt also eine beträchtliche Stabilität.

Zündet man die Entladung bei tieferen Drucken, so erhält man, wie bereits beschrieben, zunächst den der unteren Charakteristik entsprechenden Bogen. Dieser schlägt jedoch, nach vorhergehendem geringen Anwachsen der Spannung, plötzlich in eine Glimmentladung um, die dann, nachdem wiederum einige Sekunden verstrichen sind, in die Bogenentladung mit

dem stark glühenden Kathodenfleck und der oberen Charakteristik übergeht. Ein direkter Übergang von der unteren Charakteristik auf die obere ist also bei kleinen Drucken nicht möglich, sondern er erfolgt stets auf dem Umweg über eine Glimmentladung.

Wichtig erscheint weiterhin der Einfluß von gelegentlichen Verunreinigungen auf die besprochenen Vorgänge. Sind diese beträchtlich, wie beim erstmaligen Brennen der Entladung oder auch wohl bei Gegenwart von Wasserdämpfen, so dauert einmal der (je nach dem Druck direkte oder indirekte) Übergang von der unteren auf die obere Charakteristik wesentlich länger und erfordert ein Glühen der gesamten Kathode. Und zum anderen kann man dann auch Übergänge von der oberen Charakteristik auf die untere, und zwar besonders häufig bei niederen Drucken beobachten, was ja, wie oben ausgeführt, bei einigermaßen sauberen Verhältnissen nie vorkommt. Bei Gegenwart von Verunreinigungen kann also die Stabilität der Entladungsform mit der oberen Charakteristik aufgehoben werden.

Die Vermutung lag nahe, daß Verunreinigungen durch Sauerstoff alle diese Erscheinungen veranlassen können¹⁾. Wir haben daher, nachdem der Bogen mit dem hell glühenden Kathodenfleck sich eingebrannt hatte, dem Stickstoff Luft zugeführt, und zwar betrug der Sauerstoffgehalt der entstehenden Mischung weniger als 1%. In der Tat konnte hierdurch regelmäßig bei beliebigen Drucken der Übergang in die Bogenform mit dem umherirrenden Brennfleck hervorgerufen werden, und zwar mit sprungartigem Abfall der Spannung. Sauerstoff ist also allem Anschein nach imstande, die Stabilität des Bogens auf der oberen Charakteristik aufzuheben²⁾.

Schließlich haben wir zur Abrundung der Versuchsergebnisse noch versucht, mit einem Pyrometer die Temperatur des hell glühenden Kathodenflecks zu bestimmen. Es ergab sich, daß die Brennflecktemperatur sicher wesentlich über 3000° C liegen muß.

b) *Kohle* (Fig. 3). Schließt man jeweils vor der Ablesung der Spannung die zur Pumpe oder zum Stickstoffgefäß führenden Hähne, so bleiben die Verhältnisse anscheinend wegen aus der Kohle austretender Verunreinigungen nicht stationär, und die Messungen sind hierdurch außerordentlich erschwert. Das Kohlediagramm der Fig. 2 erhält man daher nur, wenn man nach bei einem höheren Druck vorgenommener Zündung den Stickstoff langsam abpumpt und schließlich wieder zuläßt und hierbei die Spannungen mißt.

¹⁾ Vgl. hierzu auch M. Wehrli, l. c. — ²⁾ Die Versuche mit Sauerstoffzusatz werden fortgesetzt.

Nach der Zündung befindet sich der Brennfleck dann auf heller Weißglut. Beim Abpumpen steigt die Spannung an und der Brennfleck wird deutlich größer, bis bei etwa 2 cm Hg die Spannung sprunghaft abfällt¹⁾ und zugleich der Brennfleck sich zusammenzieht, dunkler und unruhiger wird. Soweit wurde der Ablauf der Vorgänge bereits von Seeliger und Schmick festgestellt. Neu ist jedoch folgendes: Läßt man nun wieder Stickstoff langsam zuströmen, so tritt eine Hystereserscheinung auf. Die Bogenform mit der niedrigen Spannung und dem kontrahierten Brennfleck bleibt dann nämlich

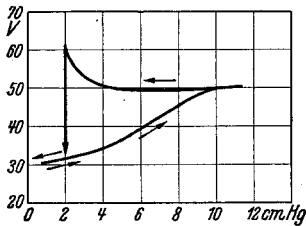


Fig. 3.
Kohle, 5 Amp.

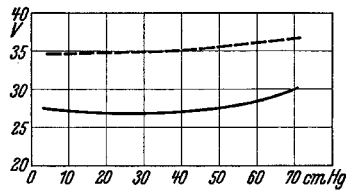


Fig. 4.
—— Eisen } 5 Amp.
- - - - Kupfer } schematisch²⁾.

erhalten. Erst bei etwa 8 cm Hg wird der obere Kurvenast wieder erreicht, und zugleich besitzt auch der Brennfleck seine ursprüngliche hohe Temperatur³⁾.

c) *Kupfer und Eisen* (Fig. 4). Bei Kupfer und Eisen erhält man stets nur eine Charakteristik, und diese entspricht, wie man aus der geringen Druckabhängigkeit der Spannungen entnehmen muß, der unteren bei Kohle und Wolfram. In Übereinstimmung damit ist, daß der Kathodenfleck umherirrt und anscheinend nicht sehr hohe Temperaturen besitzt.

Deutung der Versuchsergebnisse.

a) *Wolfram*. Die große Stabilität des Bogens mit der oberen Charakteristik, welche wir bei „reinen“ Bedingungen gefunden haben, läßt sicherlich nur den einen Schluß zu, daß die Existenz des Bogens mit der unteren Charakteristik durch eine Gasbeladung der Kathode (bzw. durch Verbindungen von Füllgasbestandteilen mit der Kathode) bedingt ist. Der

¹⁾ Den Verlauf konnten wir so, wie er aus Fig. 2 hervorgeht, auch durch oszillographische Aufnahmen bestätigen. — ²⁾ Der Unterschied zwischen den Spannungen der beiden Charakteristiken rührt wahrscheinlich von verschiedenen mittleren Bogenlängen her. — ³⁾ Wir konnten dabei nicht entscheiden, ob die untere Charakteristik bei etwa 8 cm Hg wirklich die obere erreicht, oder ob sie dann, wie beim Wolfram, dicht unter der oberen verläuft und ihr Bogen dort nur eine sehr kleine Lebensdauer besitzt. Der in der Figur angegebene Verlauf entspricht der ersteren Annahme.

Übergang von der unteren Charakteristik auf die obere kommt offenbar dadurch zustande, daß durch die Entladung die Kathode heiß wird und daher die Gasbeladung (bzw. Oberflächenschicht) von ihr abdampft. Der Kathodenfall muß bei höheren Drucken dementsprechend ansteigen und hat seinen Endwert erreicht, wenn der Kathodenfleck hell glüht, stillsteht und damit gasfrei und sauber ist. Es wird so auch ohne weiteres die erstaunliche Tatsache verständlich, daß selbst bei den geringeren Drucken der Bogen mit dem hell leuchtenden Kathodenfleck (bei verhältnismäßig sauberen Bedingungen) der stabile ist, obwohl dort die Spannungsunterschiede zwischen den beiden Bögen bis zu 50 Volt betragen. Die Kathode ist dann ebenso heiß — sie befindet sich auf heller Rotglut —, daß die Gasbeladung, welche Voraussetzung für die Existenz des umlaufenden Bogens ist, nicht bestehen kann. Unmittelbar für die Richtigkeit unserer Schlüsse sprechen schließlich auch die Beobachtungen bei verunreinigten Entladungen und besonders bei Gegenwart von Sauerstoff. Bemerkenswert ist hierbei vor allem die Möglichkeit von Übergängen von der oberen auf die untere Charakteristik. Die Verunreinigungen und der Sauerstoff sorgen dann offenbar für die Existenz der Oberflächenschicht trotz der beträchtlichen Kathodentemperaturen.

Der maßgebliche Einfluß der Gasbeladung oder Oberflächenschicht auf die Verhältnisse an der Kathode muß natürlich als Einwirkung auf die Elektronenauslösung verstanden werden, und es entsteht die Frage, wie dieser Vorgang näher zu deuten ist¹⁾. Becken und Seeliger haben, wie bereits einleitend erwähnt, die Vermutung geäußert, daß es sich bei den beiden Bögen um grundsätzlich verschiedene Auslöseprozesse handelt, daß nämlich der eine Bogen als thermischer Bogen und der andere als Feldbogen anzusehen ist. Die Hauptschwierigkeit, die Bogenform mit der unteren Charakteristik als Feldbogen zu verstehen, lag bisher nach den Rechnungen von Becken und Seeliger in dem geringen experimentellen Wert seiner Stromdichte. Becken und Seeliger haben als Feldstärke, welche notwendig ist, um die erforderliche Autoelektronenemission hervorzubringen, 10^6 Volt/cm angenommen und berechnet, daß vor der Kathode

¹⁾ Daß der Bogen mit dem umherirrenden, wenig glühenden Brennfleck gleichfalls einen thermischen Bogen darstellt, ist äußerst unwahrscheinlich, da er auch bei stärkster Kühlung der Kathode besteht (Becken und Seeliger). Dagegen spricht weiterhin, daß er durch Sauerstoffzusatz hervorgerufen werden kann. Denn Sauerstoff erhöht bekanntlich die Austrittsarbeit von Wolfram, und es liegen auch keine Anhaltspunkte dafür vor, daß man extrem niedrige Austrittsarbeiten erhält, wenn sich auf der Oberfläche der Sauerstoffschicht wieder Wolfram befindet.

solche Feldstärken bei Stromdichten von 10^4 Amp./cm² entstehen. Die wirklichen Stromdichten sind nach Becken und Seeliger jedoch wahrscheinlich nicht viel größer als 10^2 Amp./cm² und erscheinen somit als viel zu klein.

Diese ganze Schwierigkeit erscheint nun, nachdem der Einfluß der Gasbeladung festgestellt ist, behoben. Es gibt zwei verschiedene Möglichkeiten, um eine Verstärkung der autoelektronischen Emission einer Bogenkathode durch Gasbeladung (bzw. durch eine Oberflächenschicht) zu erklären. Erstens kann hierdurch die Emissionsfähigkeit des Kathodenmaterials erhöht werden. Zweitens kann die Gasschicht oder Fremdschicht (soweit es ihre elektrische Leitfähigkeit zuläßt) eine Stauung der positiven Ionen vor der Kathode und damit eine Erhöhung der Feldstärke bewirken. Beide Effekte schließen sich natürlich nicht aus, sondern können sich gegenseitig ergänzen.

Daß eine Gasbeladung die Emissionsfähigkeit ganz allgemein heraufsetzt, haben kürzlich Penning und Mulger¹⁾ festgestellt. Hiernach liegt die Einsatzfeldstärke für die Autoelektronenemission bei nicht entgasten Metallen um eine bis zwei Größenordnungen tiefer als bei entgasten. Die Autoelektronenemission beginnt dann nämlich schon bei einer Feldstärke zwischen 10^4 und 10^5 Volt/cm. Die Stromdichten, welche erforderlich sind, um diese Feldstärken hervorzubringen, betragen, wie man aus Fig. 14 in der Arbeit von Seeliger und Becken abliest, etwa 10^2 Am./cm², sie sind also gerade von der experimentellen Größe der Bogenstromdichte. Es erscheint also hiernach nicht ausgeschlossen, daß allein durch diese Erhöhung der autoelektronischen Emissionsfähigkeit die Existenz des Feldbogens ermöglicht wird.

Daß eine Gasschicht, sofern sie die notwendige Dicke besitzt, eine Stauung der positiven Ionen und damit eine Erhöhung der Feldstärke bewirken muß, ist unmittelbar einleuchtend und bedarf keiner näheren Begründung. Ist die Gasschicht sehr dick oder bilden sich auf der Kathode feste isolierende Stoffe, wie Oxyde oder Nitride, so kann unter Umständen der Effekt besonders groß werden, und es können sich Verhältnisse ergeben, wie sie an der Kathode der bekannten Spritzentladung von Güntherschulze herrschen. Wir möchten es also im Anschluß an Druyvesteyn²⁾ durchaus für möglich halten, daß die von Güntherschulze entdeckte Erscheinung in der Bogenentladung eine große Rolle spielt.

¹⁾ F. M. Penning u. G. Mulger, *Physica* **2**, 724, 1935. Wie Penning und Mulger ausgeführt haben, ist jedoch noch nicht geklärt, wie dieser große Effekt gedeutet werden kann. — ²⁾ M. G. Druyvesteyn, *Nature* **137**, 580, 1936.

Mag man die eine oder die andere Erklärungsmöglichkeit mehr bevorzugen, die Bedeutung der Gasbeladung scheint jedenfalls einfach darin zu bestehen, daß sie die erforderliche autoelektronische Emission überhaupt erst ermöglicht. Wenn die Gasbeladung abdampft, besteht für die Autoelektronenemission keine Möglichkeit mehr, und der Feldbogen muß in den thermischen Bogen oder in die Glimmentladung übergehen. Es ist deshalb auch die Annahme naheliegend, daß der Bogen mit dem hell leuchtenden Brennfleck nicht etwa als Mischform zwischen thermischem und Feldbogen anzusehen ist, sondern als rein thermischer Bogen, d. h. genauer, daß seine Elektronenemission nach der Richardson-Gleichung (mit Schottkyscher Feldkorrektur) berechnet werden kann. Die Temperatur, welche der Brennfleck dann besitzen muß, kann man zu etwa 3500° C abschätzen. Nach unserer pyrometrischen Messung erscheint es durchaus wahrscheinlich, daß der Brennfleck diese Temperatur besitzt und daher die Elektronen rein thermisch emittiert.

Daß grundsätzliche Unterschiede bei der Elektronenauslösung der beiden Bögen bestehen, geht auch aus dem gänzlich verschiedenen Spannungsdruckverlauf der beiden Bogenformen hervor. Der Spannungsanstieg des thermischen Bogens bei Druckabnahme steht sicherlich in ursächlichem Zusammenhang mit der parallelgehenden Abnahme der Stromdichte und ist jedenfalls notwendig, um die erforderliche Brennflecktemperatur aufrechtzuerhalten. Die dem Feldbogen zugeordnete Charakteristik aber hat bis zu kleinen Drucken hin etwa die gleiche Spannung, und anscheinend gilt das gleiche auch für seine Stromdichte. Hier scheinen irgendwelche Umstände die sonst immer bei abnehmendem Druck wahrzunehmende Abnahme der Stromdichte zu verhindern. Die Feldtheorie macht dies leicht verständlich. Man weiß, daß die Autoelektronenemission von einzelnen aktiven Stellen aus erfolgt¹⁾. Die Ionisation des Gases durch die vom Kathodenfall beschleunigten Elektronen kann daher auch nur in unmittelbarer Nähe dieser aktiven Stellen vor sich gehen, und dieser Umstand sollte leicht bewirken, daß die große Stromdichte auch bei kleinen Drucken erhalten und der Kathodenfall gering bleibt.

Unter allen Umständen geht aus den experimentellen Ergebnissen hervor, daß der Kathodenfall nicht nur durch das Füllgas, sondern auch durch die Eigenschaften der Kathode bedingt ist. Eine wesentliche Voraussetzung der Überlegungen von Mason²⁾ zur Theorie des Kathodenfalls,

¹⁾ A. Wehnelt u. W. Schilling, ZS. f. Phys. **98**, 286, 1935 (mit Literatur).
— ²⁾ R. C. Mason, Phys. Rev. **38**, 427, 1931.

nach welcher der Kathodenfall von Bögen unabhängig von der Beschaffenheit der Kathode allein dadurch bestimmt sein soll, daß die von der Kathode kommenden Elektronen die Ionisierungsenergie des Füllgases erreichen, berücksichtigt die Verhältnisse an der Kathodenoberfläche nicht genügend, und dies ist sicherlich der Grund dafür, daß beim Wolfram anscheinend generell der Spannungsunterschied der beiden Bogenformen das umgekehrte Vorzeichen besitzt, wie Mason fordert: der Feldbogen hat — wenn unsere Deutungen zutreffen — nicht den von Mason abgeleiteten größeren, sondern einen geringeren Kathodenfall als der thermische Bogen.

b) *Kohle*. Die Charakteristiken bei Kohle entsprechen offenbar im großen und ganzen den Wolframcharakteristiken bei starker Verunreinigung des Füllgases. Der thermische Bogen zeigt die gleichen Eigenschaften wie bei Wolfram, er wird jedoch immer bei kleinem Drucke instabil und geht in die als Feldbogen interpretierte Form über, während dies ja bei Wolfram nur bei Anwesenheit von Verunreinigungen der Fall ist. Dieser Unterschied rührt sicherlich lediglich daher, daß Kohle Gase und Verunreinigungen wesentlich fester hält als Wolfram. Es ist somit gestattet, die Überlegungen, welche wir bei der Diskussion des Wolfram Bogens durchgeführt haben, für Kohle zu übernehmen. Zusatzhypothesen sind vielleicht notwendig, um folgende Unterschiede zwischen Wolfram- und Kohlebogen zu deuten: Der Anstieg der thermischen Kohlecharakteristik erfolgt bei wesentlich kleineren Drucken als bei der Wolframcharakteristik und die Feldcharakteristik von Kohle mündet bei etwa 8 cm wahrscheinlich¹⁾ in die thermische ein, während bei Wolfram beide Charakteristiken bei höheren Drucken angenähert parallel verlaufen.

c) *Kupfer und Eisen*. Kupfer gehört nach Ramberg der Gruppe 2 an und sollte daher nur die Bildung eines Feld Bogens zulassen; bei Eisen ist die thermische Emissionsfähigkeit bei höheren Temperaturen und damit auch eine Einordnung in die Rambergschen Gruppen unbekannt. Die Versuchsergebnisse haben bestätigt, daß man mit Kupfer nur einen Feldbogen erhält, das gleiche hat sich für Eisen herausgestellt.

Eine weitgehende Reinigung der Kathoden, welche bei Wolfram und Kohle bereits durch die Erhitzung infolge der Entladung zustande kommt, ist bei Kupfer und Eisen, wie auch der stationäre Charakter der Bögen zeigt, nicht ohne besondere Maßnahmen möglich. Wir konnten jedoch

¹⁾ Vgl. Fußnote 3, S. 556.

auf weitere Versuche verzichten, da Doan und Mitarbeiter¹⁾ bereits das Verhalten von Bogenentladungen mit Eisen und anderen Metallen der Gruppe 2 unter extrem sauberen Bedingungen studiert haben.

Während es nach den ersten ihrer Arbeiten den Anschein hatte, daß an ganz sauberen Kathoden in reinsten Edelgasen überhaupt kein Bogen erhalten werden kann, hat sich in der zweiten der angeführten Arbeiten ergeben, daß mit zunehmendem Reinheitsgrad lediglich der Existenzbereich der Bogenentladung eingeschränkt wird. Man kann nämlich, wenigstens bei den bisher erzielbaren Reinheitsgraden, immer noch stationär brennende Bogen erhalten, wenn man nur genügend große Spannungen an die Elektroden anlegt. Der Einfluß von Verunreinigungen macht sich (neben einer Erniedrigung dieser für ein stabiles Brennen erforderlichen Netzspannung) dahin geltend, daß er den Kathodenfall herabsetzt. Das Verhalten der Metalle der Gruppe 2 unterscheidet sich hiernach vorläufig grundsätzlich von dem Verhalten des Wolframs: Sie gestatten auch nach extremer Reinigung die Existenz eines stabilen Feldbogens, während das Bestehen des Feldbogens bei Wolfram eine Gasbeladung oder Verunreinigungsschicht zur Voraussetzung hat. Der Einfluß der Verunreinigungen auf die Größe des Kathodenfalls ist in beiden Fällen qualitativ der gleiche, aber quantitativ verschieden. Bei Eisen und unter Atmosphärendruck beträgt der durch die Reinigung hervorgerufene Anstieg des Kathodenfalls etwa 7 Volt, und anscheinend ist er auch bei kleineren Drucken von derselben Größenordnung (besondere Angaben sind für kleinere Drucken von Doan und Mitarbeitern nicht gemacht). Bei Wolfram ruft jedoch Säuberung und Entgasung einen (bei geringen Drucken) wesentlich größeren Spannungsanstieg hervor und führt zur Bildung eines thermischen Bogens.

Herrn Professor Seeliger möchten wir für zahlreiche fördernde Diskussionen unseren Dank aussprechen.

Greifswald, Seminar für theoretische Physik.

¹⁾ G. E. Doan u. J. L. Myer, Phys. Rev. **40**, 36, 1932; G. E. Doan u. A. M. Thorne, ebenda **46**, 49, 1934; G. E. Doan u. W. C. Schultze, ebenda **47**, 783, 1935.